

Temperaturno polje neizotermnog turbulentnog mlaza

Alen Cukrov, Tomislav Horvat, Tin Vrandečić

Mentor: prof. dr. sc. Srećko Švaić

Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku

Ivana Lučića 5

srecko.svaic@fsb.hr

SAŽETAK

Radom je obuhvaćena teorijska i eksperimentalna analiza neizotermnog turbulentnog mlaza istrujavanog iz pravokutnog istrujnog otvora pri brzinama u rasponu od 3 m/s do 10 m/s. Cilj rada je pokazati primjenu termografije za mjerenje temperatura mlaza i ispitati valjanost teorijskih izraza za predviđanje temperatura mlaza. Teorijska analiza temelji se na Regenscheitovim formulacijama za pravokutne slobodne mlazeve. Eksperimentalni rezultati dobiveni su pomoću termoparova i termokamere. Rezultati termografske analize pokazali su prihvatljivo slaganje sa rezultatima dobivenim termoparovima. Termografska analiza pokazuje bolje rezultate od teorijske pri nižim temperaturama u laboratoriju.

KLJUČNE RIJEČI

Neizotermni mlaz, temperaturno polje, infracrvena termografija

1. UVOD

1.1 Motivacija

Temperaturna raspodjela u prostoru bitan je parametar toplinske ugodnosti. Klasični pristup mjerenju temperatura termoparovima podrazumijeva korištene složene mjerne opreme i opsežnu pripremu samih mjerenja. Takav način ispitivanja često je neprimjenjiv u realnim uvjetima rada. Iz tog se razloga javila inicijativa da se navedeni postupci izbjegnu primjenom infracrvene termografije. Infracrvenom

termografijom indirektno se dobiva informacija o temperaturnom polju mlaza zraka istrujavanog iz istrujnog otvora.

1.2 Cilj istraživanja

Cilj rada je pokazati mogućnosti primjene termografskog mjerenja temperature raspodjele pri strujanju neizotermnog zračnog mlaza u odnosu na mjerenje termoparovima. Nadalje, istraživanjem se dobiva informacija o točnosti postojećih izraza u literaturi. Provedeno istraživanje daje doprinos za bolje razumijevanje načina strujanja mlaza koji horizontalno istrujava iz istrujnih otvora.

2. METODE ANALIZE ZRAČNOG MLAZA

Mlaz je analiziran teorijski i eksperimentalno. U okviru teorijskog pristupa korištene su polu-empirijske jednadžbe njemačkog istraživača Bruna Regenscheita, koje se nalaze u [1] i [2]. Eksperimentalnim pristupom dobivene su vrijednosti temperature koristeći termoparove postavljene u struju zraka i infracrvenu termografiju.

2.1 Teorijska analiza mlaza

2.1.1 Fizikalne osnove

Slobodni turbulentni mlaz spada u skupinu strujanja koja se nazivaju slobodnim turbulentnim smičnim strujanjima (eng. *free turbulent shear flows*) [3]. Obično nastaje istrujavanjem fluida kroz relativno mali otvor u relativno veliki prostor ispunjen istim takvim ili sličnim fluidom u mirovanju, te njegovo strujanje nije ometano nikakvim krutim tijelom. U glavnom smjeru strujanja mlaza komponenta brzine je znatno veća nego u bilo kojem drugom smjeru [3].

Predmet istraživanja je neizotermni turbulentni mlaz koji istrujava pri brzinama od 3 m/s do 10 m/s . Kako je riječ o brzinama koje su mnogo niže od brzine zvuka, odnosno vrijednosti Machovog broja su manje od 0,3 tako strujanje smatramo nestlačivim. Turbulentno nestlačivo strujanje je, zbog svoje je stohastičke prirode, opisano vremenski osrednjenim Navier-Stokesovim jednadžbama poznatijim kao RANS jednadžbe i energetsom jednadžbom:

- jednađžba kontinuiteta:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

- jednađžba količine gibanja:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{v'_i v'_j} \right] \quad (2)$$

- energetska jednađžba:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \overline{v'_i T'}}{\partial x_i} \quad (3)$$

Gdje su $\bar{v}_i, \bar{p}, \bar{T}$ osrednjene vrijednosti, a v'_i, T' predstavnici pulsirajućih djelova polja brzine i temperature. Fizikalno gledano, nelinearni konvektivni član $\overline{v'_i v'_j}$ opisuje prijenos količine gibanja uslijed miješanja čestica fluida, a član $\overline{v'_i T'}$ označava turbulentnu difuziju temperature. Boussinesq [4] je 1868. godine predložio modeliranje člana $\overline{v'_i v'_j}$ jednađžbom:

$$-\rho \overline{v'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} \quad (4)$$

gdje je μ_t turbulentna viskoznost. Analogno je definiran turbulentni prijenos temperature:

$$-\overline{v'_i T'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (5)$$

gdje je Γ_t turbulentna temperaturna vodljivost [5]. Fizikalna osnova turbulentne viskoznosti i turbulentne temperaturne vodljivosti počiva na predodžbi da je prijenos impulsa i topline uslijed turbulentnih pulsacija

sličan prijenosu s molekularnim gibanjem. Sličnost pojmova turbulentne viskoznosti i turbulentne temperaturne vodljivosti sa molekularnim svojstvima fluida, dinamičkim viskozitetom i temperaturnom vodljivosti, je samo formalna jer je turbulencija svojstvo strujanja, a ne fluida [5]. Kako su turbulentna viskoznost i turbulentna temperaturna vodljivost svojstva strujanja, tako su ona pri laminarnom strujanju jednaka nuli [4]. S obzirom na izvornu definiciju Prandtlovog broja, definirana je bezdimenzijska značajka *turbulentni Prandtllov broj*:

$$Pr_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t} \quad (6)$$

Istraživač A. Reynolds, prema navodu [6] je 1976. godine definirao vrijednost turbulentnog Prandtlovog broja 0,5 za ravninski mlaz kakav je obuhvaćen ovom studijom. Drugim riječima, kod mlaza plina je turbulentna toplinska difuzija dominantnija od prijenosa količine gibanja. Posljedica dominantne turbulentne toplinske difuzije je veća širina temperaturnog profila u odnosu na profil brzina po poprečnom presjeku mlaza.

2.1.2 Temperaturna jednadžba slobodnog mlaza

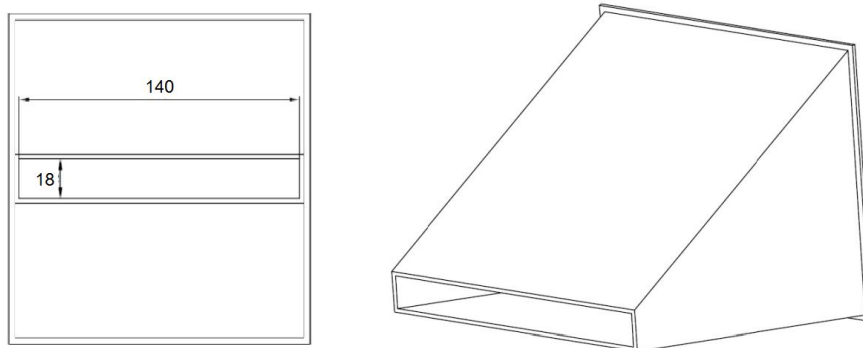
Regenscheit [1] predlaže slijedeću jednadžbu za proračun temperature na udaljenosti x od istrujnog otvora:

$$\frac{T_x - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{3}{4} \frac{T_\infty}{T_0} \sqrt{\frac{x_0}{x}} \sqrt{\frac{1 - \left(4 - \frac{1}{\lambda_0}\right)}{3 + \left(\frac{x_0}{x} - 1\right) \frac{1}{\lambda_0}}} \quad (7)$$

gdje je λ_0 omjer stranica b/h , a x_0 je dužina jezgre mlaza koja se računa kao omjer visine otvora h i stupnja mješanja m . Unutar jezgre brzina mlaza je konstantna i jednaka brzini na otvoru. T_∞ predstavlja temperaturu okoline, a T_0 je temperatura kojom zrak istrujava iz istrujnog otvora.

2.2 Eksperimentalna analiza

Mjerenja su izvršena za osam istrujnih brzina (od 3 m/s do 10 m/s) iz istrujnog otvora pravokutnog poprečnog presjeka prikazanog na slici 1.



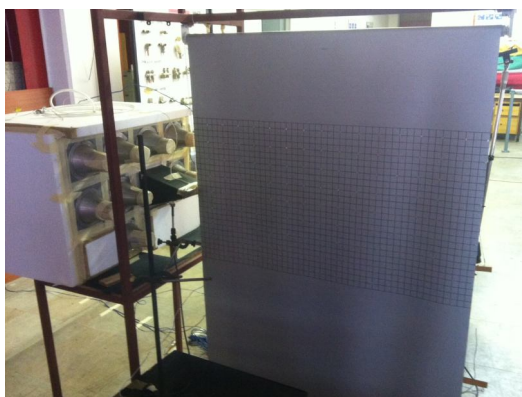
Slika 1. Prikaz u nacrtu i izometriji analiziranog istrujnog otvora dimenzija 140 x 18 mm .

Mjerena je temperatura zraka: na samom otvoru, duž osi, u prostoriji, te je mjerena prividna reflektirana temperatura. Temperatura je mjerena termoparovima tipa T postavljenim u simetralu otvora i termografskom kamerom. Mjerna linija prikazana je na slici 2.



Slika 2. Mjerna linija.

Osnovni djelovi mjerne linije su: ventilator, usisni i tlačni cjevovodi, te plenum s istrujnim otvorom. Protok zraka se namješta preko promjene broja okretaja ventilatora. Temperatura okolnog zraka mjeri se pomoću termopara smještenog u prostoriji. Zrak dolazi do ventilatora kroz usisnu cijev. Ventilator tlači zrak preko grijača u plenum. Na grijaču se zrak zagrijava na temperaturu za $8^{\circ}\text{C} \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ višu od temperature izmjerene u laboratoriju, a u plenumu se zrak smiruje odnosno dinamička komponenta tlaka biva jednaka nuli. Zbog pretlaka koji vlada u plenumu, mlaz istrujava u prostoriju. Sva temperaturna očitavanja izvršena su u stacionarnom stanju.



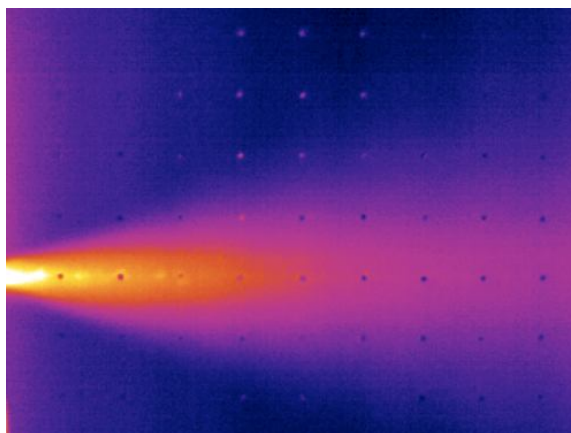
Slika 3. Platno visoke emisivnosti, za prikaz termograma.

Na slici 3. prikazano je platno za prikaz termograma (u nastavku platno) postavljeno u ravninu simetrije mlaza u svrhu mjerenja temperatura. Platno je visoke emisivnosti ($\varepsilon = 0,97$) kako bi se umanjio utjecaj zračenja okolnih objekata. Okolni medij je zrak relativne vlažnosti 50% čime je omogućeno da detektirano zračenje nije pod utjecajem apsorpcije u zraku kada se primjenjuje kamera sa područjem osjetljivosti od $7,5$ do $13 \mu\text{m}$. Na platno su, svakih 60 mm (mjerne točke), naljepljene aluminijske točke visoke refleksije za određivanje udaljenosti. Parametri objekta i okoline, koji su određeni na kameri, sumirani su u tablici 1.

Tablica 1. Parametri objekta i okoline

Udaljenost platna od kamere	1,5 m
Emisijski faktor platna	0,97
Ambijentalna temperatura	$24,6^{\circ}\text{C} - 26,5^{\circ}\text{C}$, ovisno o mjerenju
Relativna vlažnost	50%
Temperatura okolišnjeg zraka	$24,6^{\circ}\text{C} - 26,5^{\circ}\text{C}$, ovisno o mjerenju

Slika 4. pokazuje temperaturno polje mlaza istrujavanog istrujnom brzinom 3 m/s.



Slika 4. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 3 m/s.

Termoparovi tipa T (bakar-konstantan) s točnošću $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ su postavljeni horizontalno u simetralu otvora kao što je prikazano na slici 5. Termoparovi su postavljeni u 16 mjernih točaka. Razmak između dvije točke je 60 mm. Svakim termoparom zabilježeno je 60 vrijednosti temperature i izračunat je prosjek istih.



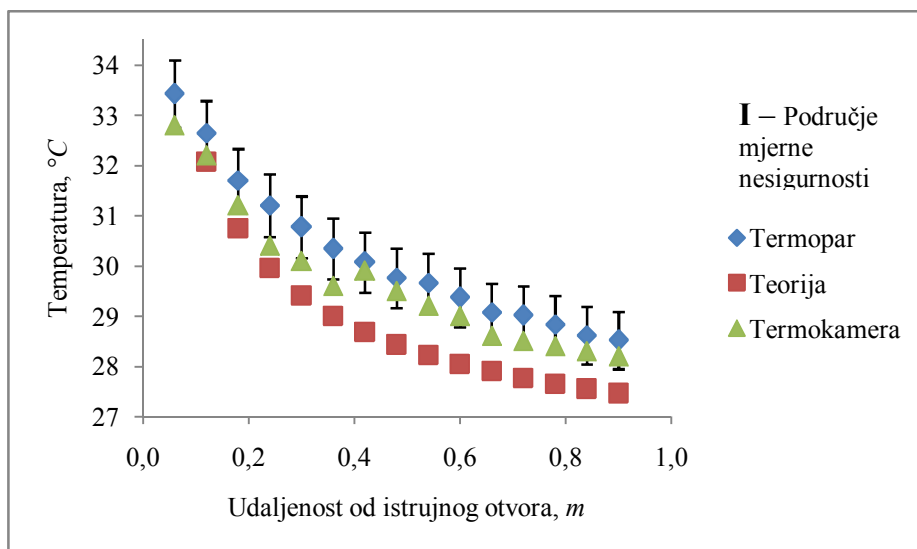
Slika 5. Termoparovi u struji zraka.

3. DISKUSIJA REZULTATA

Teorijska rješenja temperaturne raspodjele, izračunata prema (7), kod istrujnog otvora dimenzija $140 \times 18 \text{ mm}$ pokazuju prosječna odstupanja u rasponu od 2,9% (pri istrujnoj brzini 4 m/s) do 4,8% (za istrujnu brzinu 9 m/s). Pri brzinama od 3 m/s do 8 m/s , zabilježeno je najveće odstupanje u prvoj mjernoj točki, dok je kod istrujnih brzina 9 m/s i 10 m/s prijavljeno najveće odstupanje na udaljenosti $0,54 \text{ m}$ od istrujnog otvora.

Spomenuto odstupanje u prvoj točki kreće se u rasponu od 5,1% (za istrujnu brzinu 7 m/s) do 7,1% (pri istrujnoj brzini 4 m/s). Valja istaknuti da u svih šest obuhvaćenih odstupanja se radi o dobivenoj temperaturi većoj od one na istrujnom otvoru. Pri brzinama od 9 m/s i 10 m/s najveće odstupanje je uočeno na udaljenosti $0,54 \text{ m}$, te je iznosilo 5,6% odnosno 4,9%. Također je i pri brzinama od 9 m/s i 10 m/s uočeno da je u prvoj točki izračunata temperatura veća od temperature na istrujnom otvoru.

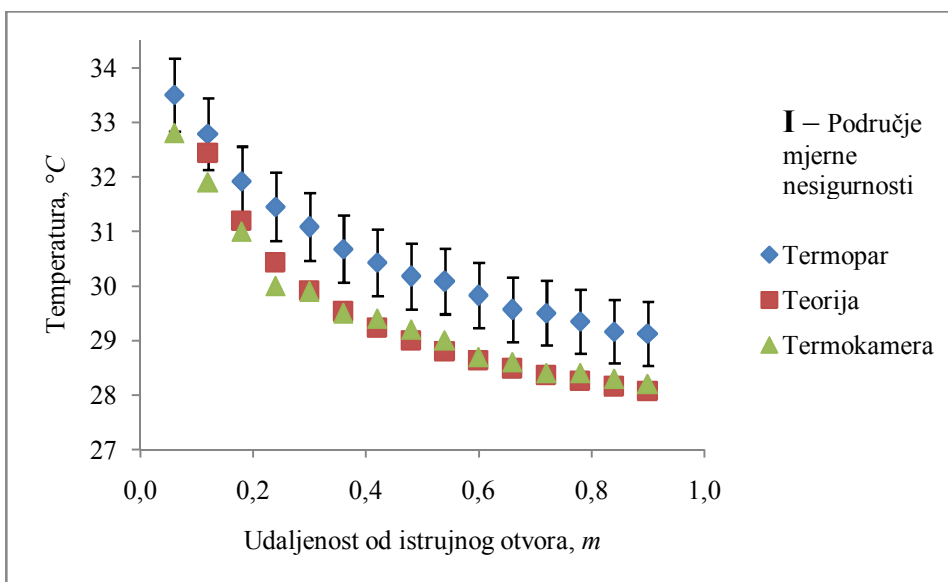
Termogrami mlaza pokazali da se postavljanjem platna u ravninu simetrije dobivaju vrijednosti temperatura koje imaju manje odstupanje od teorijskih izraza za proračun temperature mlaza.



Slika 6. Istrujna brzina $10,12 \text{ m/s}$, temperatura u laboratoriju $25,82^{\circ}C$.

Nesigurnost navedena u dijagramu je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k = 2$). Proširena mjerna nesigurnost termopara iznosi 650 mK .

Uočeno je da su mjerenja pri istrujnim brzinama 10 m/s , 9 m/s , 8 m/s , i 6 m/s , koja su izvršena pri temperaturama u laboratoriju od $26,2 \text{ °C}$ i nižim pokazala manja prosječna odstupanja od mjerenja izvršenih pri temperaturama u laboratoriju višim od $26,2 \text{ °C}$. Prosječna odstupanja tih temperatura se kreću u vrijednostima od $0,6\%$ (pri 9 m/s) do $2,5\%$ (pri 8 m/s i 6 m/s). Najniže prosječno odstupanje od $0,6\%$ prijavljeno je kod istrujne brzine 9 m/s , kada je temperatura u laboratoriju bila najniža, $24,6 \text{ °C}$.



Slika 7. Istrujna brzina $7,03 \text{ m/s}$, temperatura u laboratoriju $26,52 \text{ °C}$.

Ispitivanjem mlazeva sa istrujnim brzinama 7 m/s i 5 m/s uočena su najveća odstupanja od temperatura mjerenih termoparovima. Mlazevi sa istrujnim brzinama 7 m/s i 5 m/s ispitivani su pri najvišim temperaturama u laboratoriju od $26,5 \text{ °C}$ (7 m/s) i $26,4 \text{ °C}$ (5 m/s). Prosječna odstupanja iznose: $3,4 \%$ kod mlaza sa istrujnom brzinom 7 m/s , te $3,3\%$ za mlaz sa istrujnom brzinom 5 m/s . Najniže ispitne istrujne brzine, 4 m/s i 3 m/s , mjerene su pri temperaturama u laboratoriju od $26,1 \text{ °C}$ (4 m/s) i $26,2 \text{ °C}$ (3 m/s). Prijavljena su prosječna odstupanja od $2,2\%$ (4 m/s) i $2,4\%$ (3 m/s). Jedan od razloga za postojanje odstupanja može se pronaći u

činjenici da je uvijek prisutan izvjestan toplinski otpor između struje zraka i platna zbog niskih vrijednosti koeficijenata konvektivnog prijelaza topline α pri malim brzinama strujanja zraka. Drugi razlog je povećana izmjena topline zračenjem između platna i okoline kada je platno pri višoj temperaturi.

4. ZAKLJUČAK

Opisanim istraživanjima, provedenim u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, ispitan je istrujni otvor dimenzija 140 x 18 mm, pri osam različitih brzina istrujavanja. Iz dobivenih rezultata zaključuje se da termografska analiza daje zadovoljavajuće rezultate jednodimenzionalnih temperaturnih polja u simetrali mlaza. Međutim mjerenja valja vršiti pri nižim temperaturama od 25°C radi eliminacije greške mjerenja koja nastaje zbog povećane izmjene topline zračenjem između platna i okolnih objekata kada se platno nalazi na povišenoj temperaturi.

Zahvala

Na ovom mjestu želimo najprije zahvaliti prof. dr. sc. Srećku Švaiću na moralnoj i stručnoj podršci, te na omogućavanju uvjeta za provedbu istraživanja. Nadalje, želimo izraziti veliku zahvalnost prof. dr. sc. Zdravku Viragu na diskusijama, dr. sc. Darku Smoljanu, te dr. sc. Nenadu Ferdeljiju na smjernicama pri početku istraživanja. Sva ljepota teorijske spoznaje ne bi mogla biti eksperimentalno kvantificirana bez gospodina Željka Badžeka i Alana Rodića, mag. ing. mech. koji su nam pomogli u laboratoriju.

BIBLIOGRAFIJA

1. Regenscheit, B., Berechnung für radial stormenden Frei- und Wandstrahlen, sowie von Rechteckstrahlen, *Gesundheits-ingenieur*, 1971.
2. Recknagel, E., Sprenger, H.W., *Taschenbuch für Heizung – und Klimatechnik*, München: R. Oldenbourg Verlag, 2005.
3. Smoljan, D. Razvoj matematičkog modela za ocjenu toplinske ugodnosti u spojenom mlazu, *doktorski rad*, FSB, Zagreb, 2011.
4. Virag, Z., *Mehanika fluida II*, predavanja, FSB, Zagreb

5. Tadić, M., Numerička metoda određivanja prijelaza topline kod hidrodinamički izobraženog turbulentnog strujanja u cijevi uz proizvoljne toplinske rubne uvjete, *doktorski rad*, FSB, Zagreb, 1993.
6. DeWulf, M. D., Computational fluid dynamics prediction of subsonic axisymmetric and two-dimensional heated free turbulent air jets, *Master's Thesis*, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2000.
7. Andrassy, M., Boras, I., Švaić, S., *Osnove termografije s primjenom*, Kigen d.o.o., Zagreb, 2008.
8. Galović, A., *Termodinamika II*, IV. izdanje, FSB, Zagreb, 2008.